

University of Groningen

A new perspective on the development of motor variability during middle childhood

Golenia, Laura

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2018

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Golenia, L. (2018). *A new perspective on the development of motor variability during middle childhood*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

APPENDICES

SUMMARY

SAMENVATTING (SHORT SUMMARY IN DUTCH)

ZUSAMMENFASSUNG (SHORT SUMMARY IN GERMAN)

ACKNOWLEDGMENTS

CURRICULUM VITAE

SCIENTIFIC OUTPUT

CONFERENCE CONTRIBUTIONS



SUMMARY

In recent decades, many researchers have argued that describing and examining variability in motor behavior is essential in understanding motor development. Variability refers to the ubiquitous variations that occur in motor behavior across repetitions of the same task. Unfortunately, motor variability has been a core theme only in the field of early childhood development (0-5 years of age) and not in middle childhood development (5-10 years of age). However, this is an important developmental period, but often overshadowed by the focus on early childhood. This thesis aims to increase the understanding about developmental changes in motor variability during middle childhood by examining variability in goal-directed reaching movements in typically developing (TD) children and in children with Developmental Coordination Disorder (DCD) in a novel way.

Until now, the few studies that examined variability in reaching movements during middle childhood solely quantified variability by means of the amount of performance variability about a mean, such as the amount of errors of the endpoint around a target. Variability measured in this particular way is considered to reflect inconsistency, which resulted in a negative connotation of variability in middle childhood development. However, the Dynamic Systems (DS) theory sees variability as a ubiquitous and characteristic biological feature that has inherent structure and meaning in itself. According to the DS theory, alternative ways of characterizing variability should therefore be used. This thesis followed the DS theory and started with focusing on variability in joint angle configurations.

Joint angles are defined as the relative orientations of the different segments of the arm and hand. Importantly, the joint angle configurations of the arm are abundant, meaning that the number of available joint angle configurations exceeds the number of joint angle configurations that are minimally necessary to accomplish a task. This abundance in joint angle configurations naturally affords variability in that there are multiple joint angle combinations that achieve the same performance. This variability is useful and even vital for many aspects of motor behavior. However, there is also variability in joint angle configurations that does affect performance. The Uncontrolled Manifold method was used to separate variability in joint angles based on its effect on task performance. Applied to reaching movements, where performance is reflected in the position of the index finger, variability in joint angles was partitioned into variability that does not affect the position of the index finger (V_{ucm}) and in variability that does affect the position of the index finger (V_{ort}).

Chapter 2 examined for the first time the developmental changes in variability in joint angle configurations in 5- to 10-year-old TD children in a goal-directed reaching task. Results revealed that V_{ucm} was larger than V_{ort} in all children and that V_{ucm} and V_{ort} decreased with age. Importantly, these developmental trends were different from the trends found for variability at the performance level. Following up on this discovery, **chapter 3** examined whether different task constraints change the

developmental trends of V_{ucm} and V_{ort} . Adults have been shown to exploit the abundance in their motor system when task demands increase. To assess how children in middle childhood utilize the abundance of their motor system when necessary, a challenging reaching condition was introduced. In the challenging condition, the target position could switch unexpectedly. Results revealed that when task demands increased, 5 to 8-year-old children showed no changes in V_{ucm} , whereas 9 and 10-year-old children and adults had higher values of V_{ucm} , indicating that the ability to tailor V_{ucm} to changing task constraints develops. V_{ort} slightly increased in all age groups in the challenging condition. Chapter 2 and 3 showed that variability plays an important role in middle childhood motor development. It follows that insight into the nature of the underlying developmental processes and thus the nature of the system being studied may be increased by examining variability in different ways and at different levels of the system.

How to view and measure motor variability is also a hot topic in research on DCD, which is a coordination disorder that emerges during middle childhood, and which is characterized by high levels of motor variability. Most studies on variability in DCD until now assumed that this high variability hinders performance. However, recent literature reviews have pointed out that not all variability in DCD might be hindering and that variability should be approached in alternative ways to get more details about what the underlying source of high variability in this disorder might be. This thesis subscribed to this newly stated view in the DCD literature and started with examining variability in joint angles in children with DCD (**chapter 4**). Results showed that children with DCD had higher values of V_{ucm} compared to aged-match controls, whereas V_{ort} and performance errors were similar between groups. Thus, the high variability found in children with DCD was the variability not affecting performance, suggesting that not all variability exhibit by children with DCD is hindering performance. This demonstrates that variability might play a different role in DCD than assumed until now. Broadening the concept of motor variability in DCD may offer new understanding about possible underlying coordination mechanisms of this disorder.

This thesis also elaborated in more detail on how ideas of the DS theory can positively contribute to the understanding of developmental changes in reaching (**chapter 5**). The DS theory argues to concentrate on all components of the system, including the environment and the task, because it is assumed that motor behavior and changes in motor behavior emerge from various contributing components. This thesis underlines the proposal of the DS theory that all levels and components of the systems should be examined so that a level-overarching explanation of developmental changes in reaching can be achieved. In doing this it is also emphasizes that motor variability has multiple developmental trajectories that emerge depending on the interaction between organismic, environmental, and task constraints.

Altogether, this thesis offers compelling empirical arguments to consider variability in middle childhood as something more than just inconsistency. Not all variability in mid-childhood development has a negative connotation. It paves the way for a new perspective on variability in middle childhood in TD children as well as in children with DCD. New discussions about the role of variability in middle childhood development are triggered and new ideas and possibilities for future studies are offered. The studies within this thesis can be an inspiring example for developmental studies and studies on DCD by showing how to embrace the rich variability and complexity inherent in development and how to embed this complexity within a systems framework.

SAMENVATTING (SHORT SUMMARY IN DUTCH)

In de afgelopen decennia hebben veel onderzoekers betoogd dat het onderzoeken van variabiliteit in motorisch gedrag essentieel is voor het begrijpen van de motorische ontwikkeling. Variabiliteit beschrijft de alomtegenwoordige variaties die optreden in motorisch gedrag over herhalingen van dezelfde taak. Helaas heeft motorische variabiliteit vooral aandacht gekregen in de vroege kindertijd (0-5 jaar oud) en zelden in de basisschoolleeftijd (5-10 jaar). Deze leeftijdsfase is een belangrijke ontwikkelingsperiode die vaak overschaduwd wordt door de focus op de vroege kinderjaren. Dit proefschrift heeft daarom als doel het inzicht in ontwikkelingsveranderingen in motorische variabiliteit tijdens de basisschoolleeftijd te vergroten door variabiliteit in doelgerichte reikbewegingen op een nieuwe manier te onderzoeken.

De variabiliteit in reikbewegingen in de basisschoolleeftijd werd tot nu toe uitsluitend bestudeerd op het prestatieniveau, zoals de nauwkeurigheid van een beweging naar een doelwit. Dit werd gekwantificeerd aan de hand van de hoeveelheid variabiliteit ten opzichte van een gemiddelde. Als gevolg van deze benadering is variabiliteit op prestatieniveau een maat voor consistentie van de beweging geworden. Hierdoor werd variabiliteit in de ontwikkeling gedurende de basisschoolleeftijd tot nu toe als iets negatiefs beschouwd. De dynamische systeem (DS) theorie heeft echter een andere kijk op variabiliteit. Deze theorie beschouwd variabiliteit als een informatief biologisch kenmerk dat structuur en betekenis heeft. Volgens de DS-theorie moeten daarom alternatieve methoden worden gebruikt om variabiliteit te karakteriseren. Ook moet variabiliteit op verschillende analyseniveaus worden onderzocht, bijvoorbeeld naast het prestatieniveau ook op het niveau van de gewrichtshoeken. Dit proefschrift sluit zich aan bij de DS-theorie en bestudeert de variabiliteit in combinaties van gewrichtshoeken van de arm over herhalingen van dezelfde reiktaak.

Een essentieel aspect van de gewrichtshoek configuraties is dat ze redundant (overtollig) zijn. Dit betekent dat het aantal beschikbare combinaties van gewrichtshoeken groter is dan het aantal combinaties van gewrichtshoeken dat minimaal nodig is om een taak te volbrengen. Deze redundantie in gewrichtshoeken zorgt voor natuurlijke variabiliteit. In een doelgerichte reiktaak zijn er dus meerdere combinaties van gewrichtshoeken van de arm mogelijk om dezelfde prestatie te volbrengen. Als gevolg van de redundant combinaties van de gewrichtshoeken is er dus variabiliteit in gewrichtshoeken over herhalingen van dezelfde reiktaak die de prestatie niet beïnvloedt. Deze variabiliteit wordt V_{ucm} genoemd en is nuttig en zelfs nodig voor flexibel motorisch gedrag. Er is echter ook variabiliteit in gewrichtshoeken die de prestatie wel beïnvloedt. Deze variabiliteit wordt V_{ort} genoemd. Daarom wordt de *Uncontrolled Manifold* (UCM) methode gebruikt om variabiliteit op het niveau van de gewrichtshoeken te delen in V_{ucm} en in V_{ort} .

Met behulp van de UCM methode werden in **hoofdstuk 2** voor het eerst de veranderingen in variabiliteit in gewrichtshoeken bij 5- tot 10-jarige kinderen met een normale motorische ontwikkeling onderzocht tijdens een doelgerichte reiktaak. De resultaten laten een afname in V_{ucm} en V_{ort} zien over de leeftijd. Een belangrijke bevinding is dat deze ontwikkelingstrends verschillen van de trends in variabiliteit op het prestatieniveau (fouten bij het doelwit). In navolging van deze uitkomst wordt in **hoofdstuk 3** onderzocht of verschillende taakeisen de ontwikkelingstrend van V_{ucm} en V_{ort} veranderen. Bij volwassenen werd eerder aangetoond dat ze meer combinaties van gewrichtshoeken gebruiken wanneer de taakeisen toenemen. Om te beoordelen hoe kinderen van 5 tot 10 jaar van de vele mogelijke combinaties van gewrichtshoeken in de arm gebruiken maken om een reiktaak uit te voeren, wordt een uitdagende reikconditie geïntroduceerd. In de uitdagende reikconditie is de positie van het doel onzeker. De resultaten laten zien dat wanneer de taakeisen toenamen, 5 tot 8-jarige kinderen geen veranderingen in V_{ucm} laten zien, terwijl 9 en 10-jarige kinderen en volwassenen hogere waarden van V_{ucm} hebben. In deze conditie is V_{ort} licht verhoogd in alle leeftijdsgroepen. Dit suggereert dat het vermogen om V_{ucm} aan te passen aan veranderende taakeisen zich ontwikkelt als kinderen ouder worden.

Hoofdstuk 2 en 3 laten zien dat variabiliteit een belangrijke rol speelt in de motorische ontwikkeling gedurende de basisschoolleeftijd en dat verschillende processen een rol spelen bij veranderingen in variabiliteit op verschillende niveaus. Hieruit volgt dat inzicht in de aard van de onderliggende ontwikkelingsprocessen kan worden vergroot door variabiliteit op verschillende manieren en op verschillende niveaus van het systeem te onderzoeken.

Variabiliteit in motorisch gedrag is ook een belangrijk onderwerp in onderzoek naar Developmental Coordination Disorder (DCD). DCD is een coördinatiestoornis die zich voordoet tijdens de kindertijd en welke wordt gekenmerkt door een hoge mate van motorische variabiliteit. In de meeste studies werd tot nu toe aangenomen dat deze hoge variabiliteit de prestaties van kinderen met DCD belemmert. Recente literatuuroverzichten hebben echter gesuggereerd dat niet alle variabiliteit nadelig hoeft te zijn en dat variabiliteit moet worden benaderd op alternatieve manieren om meer informatie te krijgen over de onderliggende oorzaak van de variabiliteit bij DCD. Daarom is het doel van **hoofdstuk 4** variabiliteit in gewrichtshoeken bij kinderen met DCD te onderzoeken. De resultaten tonen aan dat kinderen met DCD hogere waarden van V_{ucm} hebben dan kinderen met een normale motorische ontwikkeling, terwijl V_{ort} en prestatiefouten vergelijkbaar waren tussen de groepen. Dus, de grote variabiliteit die is gevonden bij kinderen met DCD is variabiliteit die de prestaties niet beïnvloedt. Dit suggereert dat niet alle variabiliteit van kinderen met DCD de prestaties belemmert. De resultaten van dit hoofdstuk duiden erop dat variabiliteit in DCD mogelijk een andere rol speelt dan tot nu toe werd aangenomen. Het verbreden van de opvattingen over motorische variabiliteit bij kinderen met DCD kan nieuwe inzichten bieden over mogelijke onderliggende coördinatiemechanismen.

In **hoofdstuk 5** wordt in meer detail uitgewerkt hoe ideeën van de DS-theorie een positieve bijdrage kunnen leveren aan het begrijpen van ontwikkelingsveranderingen in reikgedrag. De DS-theorie betoogt dat motorisch gedrag en veranderingen in motorisch gedrag voortkomen uit bijdragen van verschillende componenten van een systeem, inclusief de persoon, de omgeving en de taak. Dit proefschrift benadrukt de stelling van de DS-theorie dat alle componenten van het systeem moeten worden onderzocht, zodat een overkoepelende verklaring van ontwikkelingsveranderingen kan worden bereikt, die de verklaringen op de verschillende niveaus overstijgt. In dit proefschrift wordt ook aangetoond dat motorische variabiliteit meerdere ontwikkelingsroutes heeft, afhankelijk van de interactie tussen organismische, omgevings- en taakeisen. Hoofdstuk 5 pleit dat het gebruik van de DS-theorie zou kunnen bijdragen aan een beter begrip van ontwikkelingsprocessen op het gebied van reiken.

Samenvattend bieden de studies van dit proefschrift een overtuigend empirisch argument om variabiliteit in de basisschoolleeftijd te beschouwen als meer dan alleen inconsistentie. Niet alle variabiliteit in de motorische ontwikkeling heeft een negatieve connotatie. Dit proefschrift is de aanzet voor een nieuw perspectief op variabiliteit in de basisschoolleeftijd bij kinderen met en zonder DCD. Gebaseerd op de resultaten van dit proefschrift kunnen nieuwe discussies over de rol van variabiliteit in de ontwikkeling van de basisschoolleeftijd worden gevoerd en nieuwe ideeën en mogelijkheden voor toekomstige studies worden ontplooid. De studies in dit proefschrift zijn een inspirerend voorbeeld voor nieuwe ontwikkelingsstudies en studies over DCD door te laten zien dat variabiliteit in de ontwikkeling ook positief opgevat kan worden en hoe deze variabiliteit ingebed kan worden in een dynamische systeem theorie.

ZUSAMMENFASSUNG (SHORT SUMMARY IN GERMAN)

Variabilität ist ein inhärentes Merkmal der motorischen Entwicklung. Sie bezeichnet die Variationen, die bei der Wiederholung von Bewegungen auftreten. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben in den vergangenen Jahrzehnten erkannt, dass die Untersuchung der Variabilität im motorischen Verhalten für das Verständnis der motorischen Entwicklung wesentlich ist. Bis heute wurde hauptsächlich die Rolle der Variabilität im motorischen Verhalten in der frühkindlichen Entwicklung (0-5 Jahre) wissenschaftlich erforscht. Entwicklungen von Variabilität im Grundschulalter (5-10 Jahre), das eine ebenso entscheidende Periode in der motorischen Entwicklung umfasst, wurden bisher jedoch weitestgehend vernachlässigt. In meiner Dissertation habe ich meinen Forschungsschwerpunkt daher auf die Variabilität in der motorischen Entwicklung im Grundschulalter gerichtet und die Entwicklung innerhalb der Variabilität mit einem neuen Ansatz untersucht. Hierbei habe ich mich auf zielgerichtete Zeigebewegungen (*reaching movements*) des Armes fokussiert, bei der der Zeigefinger des Kindes schnell und treffsicher auf ein bestimmtes Ziel weisen muss.

Bisherige Studien zum Thema haben Variabilität in der motorischen Entwicklung während des Grundschulalters lediglich als ein Maß für die Inkonsistenz der Bewegung gedeutet und daher oft als etwas Negatives bewertet. Es gibt jedoch auch Ansätze, die eine positive Auffassung von Variabilität haben, wie zum Beispiel die *Dynamic Systems* (DS) Theorie. Die DS Theorie betrachtet Variabilität im motorischen Verhalten als ein informatives biologisches Merkmal, dem eine eigene Struktur und Bedeutung zugrunde liegt. Ich habe bei meinen Untersuchungen der motorischen Variabilität im Grundschulalter einen neuen Ansatz gewählt, der durch die Ideen der DS Theorie beeinflusst wurde. Natürliche Variabilität in Zeigebewegungen, welche für viele Aspekte des motorischen Verhaltens nützlich und für ein flexibles motorisches Verhalten sogar notwendig ist, ist in den unzähligen Kombinationen der Gelenkwinkel des Arms zu finden.

Ein Gelenkwinkel wird allgemein definiert als die relative Orientierung zweier Segmente des Arms. Die Gelenkwinkel im Arm können auf unzählige, verschiedene Weise kombiniert werden. Das bedeutet, dass es mehrere Gelenkwinkelkombinationen gibt, mit denen die Zeigebewegung treffsicher ausgeführt werden kann. Diese Vielzahl an Gelenkwinkelkombinationen ermöglicht natürliche, nützliche Variabilität. Diese Variabilität kann daher als „gute“ Variabilität bezeichnet werden. Es gibt jedoch auch Kombinationen von Gelenkwinkeln im Arm, die die Zeigebewegung nicht treffsicher ausführen. Diese Variabilität kann somit als „schlechte“ Variabilität bezeichnet werden. Um die Variabilität in den Gelenkwinkeln in „gute“ und „schlechte“ Variabilität unterscheiden zu können, wurde eine mathematische Methode benutzt, die in der Wissenschaft unter dem Namen *Uncontrolled Manifold Method* bekannt ist.

In **Kapitel 2** werden erstmals die Unterschiede von „guter“ und „schlechter“ Variabilität bei 5- bis 10-jährigen Kindern mit einer typischen motorischen Entwicklung während der Ausführung von Zeigebewegungen beschrieben. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass alle Kinder deutlich mehr „gute“ als „schlechte“ Variabilität haben und dass sowohl „gute“ als auch „schlechte“ Variabilität mit zunehmendem Alter nachlassen. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird in **Kapitel 3** untersucht, ob unterschiedliche motorische Aufgabenanforderungen die Entwicklungstrends von „guter“ und „schlechter“ Variabilität verändern. Studien haben gezeigt, dass Erwachsene mehr Kombinationen von Gelenkwinkeln verwenden (mehr „gute“ Variabilität), wenn die Aufgabenanforderungen steigen. Um zu untersuchen, wie Kinder im Grundschulalter „gute“ Variabilität bei steigenden Anforderungen nutzen, wurde der Schwierigkeitsgrad der Zeigebewegung erhöht. Die Ergebnisse zeigen, dass Kinder ab dem Alter von 9 Jahren die „gute“ Variabilität in dieser Situation erhöhen und damit den gegebenen Reichtum an Bewegungsmöglichkeiten ausnutzen. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 2 und 3, dass Variabilität im motorischen Verhalten bei Kindern im Grundschulalter nicht nur als etwas Negatives bewertet werden sollte, sondern dass Variabilität auch eine positive Rolle spielen kann.

Motorische Variabilität ist außerdem ein wichtiges Thema in der Forschung zur „Developmental Coordination Disorder“ (DCD), einer Koordinationsstörung, die während der Grundschulzeit auftritt. Auch hier wurde Variabilität bisher als etwas Negatives aufgefasst, als etwas, das die Bewegungen von Kindern mit DCD einschränkt. Die Ergebnisse von **Kapitel 4** zeigen jedoch interessanterweise höhere Werte von „guter“ Variabilität bei Kindern mit DCD im Vergleich zu gleichaltrigen typisch entwickelnden Kindern, während sich die „schlechte“ Variabilität nicht verändert hat. Dies untermauert, dass Variabilität bei DCD eine positivere Rolle spielen könnte als bisher angenommen. Die Erweiterung des Konzepts der motorischen Variabilität in DCD kann zu neuen Erkenntnissen über zugrunde liegende Koordinationsmechanismen dieser Erkrankung führen.

In **Kapitel 5** wird detailliert ausgeführt, wie die Ideen der DS Theorie einen positiven Beitrag zum Verständnis von Entwicklungsänderungen leisten können. Anstatt sich nur auf das Gehirn zu konzentrieren, plädiert die DS Theorie dafür, sich auf alle Komponenten des Körpers zu fokussieren (Muskeln, Gelenkwinkel usw.), einschließlich der Umgebung. Es wird davon ausgegangen, dass die Entwicklung des motorischen Verhaltens aus dem Zusammenspiel verschiedener Komponenten entsteht. Diese Dissertation unterstützt die Ideen der DS Theorie, indem sie zeigt, dass wichtige Erkenntnisse durch die Konzentration auf die Untersuchung der Gelenkwinkel gewonnen werden konnten.

Insgesamt ebnet diese Arbeit den Weg für eine neue Perspektive auf die Variabilität bei Kindern im Grundschulalter mit einer typischen Entwicklung sowie bei Kindern mit DCD. Neue Diskussionen über die Rolle der Variabilität im Grundschulalter werden angestoßen und neue Möglichkeiten für

zukünftige Studien präsentiert. Diese Arbeit kann als positives Beispiel für Entwicklungsstudien und Studien zur DCD gelten, da sie das Verständnis von Variabilität im motorischen Verhalten erweitert.

ACKNOWLEDGMENTS

This thesis came into being thanks to the support of many individuals. I would like to express my sincere thanks to all of them. Some of those individuals I would like to thank personally.

In eerste plaats wil ik mijn dankbaarheid aan **Dr. R. M. Bongers** uitspreken. Beste Raoul, in de Bachelor zijn we samen gestart met dit project en sindsdien heb je me in alle fasen ervan begeleid en ondersteund. In deze tijd heb je me ontzettend veel geleerd, en dat ging veel verder dan alleen onderzoek. Ik heb enorm genoten van onze diepgaande discussies over de data, theorieën en mogelijke interpretaties. Je passie voor de wetenschap en het onderwerp is inspirerend. Bedankt voor jouw steun en inzet, jouw begeleiding heeft me geholpen de wetenschapper te worden die ik nu ben.

Daarnaast wil ik graag mijn grote dank uitspreken aan **Dr. M. M. Schoemaker**. Beste Marina, door jouw tweedejaars vak over motorische ontwikkeling heb je mij enthousiast gemaakt voor het vakgebied. Sindsdien heb je mij gestimuleerd om mijn eigen ideeën verder te ontwikkelen en uit te dragen. Jouw expertise in het veld van ‘Developmental Coordination Disorder’ waren van groot belang voor dit project. Jouw rustgevende en structurele aanpak hebben me erg geholpen. Marina, bedankt voor jouw betrokkenheid, je advies, hulp en sturing.

Prof. dr. E. Otten, beste Bert, bedankt dat je mij de ruimte hebt gegeven om mijn eigen pad te bewandelen en deze op de juist momenten bij te sturen. Je kritische wetenschappelijke bijdrage aan de artikelen en je professionele omgang heeft mij gescherpt en goed gedaan.

Dr. L. M. Mouton, beste Noor, toen ik zonder veel kennis van de Nederlandse taal zenuwachtig in mijn allereerste college zat, stond jij als docent voor me en dat heeft me meteen rust en moed gegeven. Dit is ook in de tijd daarna zo gebleven; jouw steun en rustgevende woorden op cruciale momenten in dit project hebben mij erg geholpen. Veel geleerd heb ik van jouw kritische blik op nieuwe ideeën, op manuscripten, en voor presentaties. Noor, bedankt dat je altijd voor me klaar stond om te steunen.

Prof. Dr. K.E. Adolph, dear Karen, thank you for giving me the opportunity to come to New York to gain experience in your lab. I am so grateful for the skills and knowledge you taught me. Working with you was inspiring, exciting and so much fun. I am deeply impressed by your involvement in so many different interesting projects. I truly enjoyed working with you and I cannot thank you enough for everything you did for me.

Leden van de leescommissie, **prof. dr. M. Hadder-Algers**, **prof. dr. Bert Steenbergen** en **prof. dr. Beatrix Vereijken**, bedankt voor de tijd en energie die jullie hebben genomen om dit proefschrift te lezen en te beoordelen.

Dit proefschrift zou zonder de hulp van de vele **studenten** niet tot stand gekomen zijn. In het bijzonder wil ik **Merle** en **Iris** bedanken voor de hulp bij het verzamelen van de data. Daarnaast wil ik **Jessika van Hoorn** bedanken voor haar hulp bij het werven van proefpersonen. Ook wil ik de **kinderen**, hun **ouders** en de **studenten** bedanken die hebben deelgenomen aan de experimenten. Mijn dank gaat natuurlijk ook uit naar **Emyl**, **Dirk** en **Wim**, voor de technische ondersteuning en de reddingsacties tijdens dataverzamelingen. Voor het stimuleren van mijn bredere ontwikkeling wil ik graag het **fonds experimentele en klinische anesthesiologie** en de verschillende '**journal clubs**' bedanken. Daarnaast ben ik ben erg dankbaar voor de ondersteuning van **prof. dr. I. Molema**, beste Ingrid, bedankt voor je open deur, raad en hulp!

Justine, Jen, Do Kyeong, Whitney, Shohan, David and all other **colleagues of the Infant action lab**, thank you so much for making my time in New York such a great experience. I will never forget the lab meetings, the lively discussions, or the sushi lunches. **Jen**, I am so grateful that you and Victor let me stay with you without even knowing me. **Justine**, New Orleans and the four weeks we spent together in New York were amazing.

PhD studenten van Bewegingswetenschappen, dat ik elke dag met plezier naar mijn werk ging, is vooral dank jullie. De gezellige koffie en lunchpauzen bepaalden het ritme van mijn dag. Dankzij jullie ben ik ook een stuk Nederlander geworden: ik eet bitterballen, ik ken meer dan 10 schaatsers bij naam en ik integreer worden zoals 'Berlijn' in mijn Duitse taalgebruik. Salsa dansen, kamerborrels, Antwerpen, Miami, Cuba en Toulouse zijn alleen een paar van de highlights van de leuke tijd met jullie. Mijn laste stelling zou eigenlijk moeten zijn: *geen leuke collega's, geen proefschrift*.

Inge en **Anniek**, mijn paranimfen, jullie hebben elk moment van de afgelopen 2 ½ jaar met mij meegemaakt. Bedankt voor jullie steun, bemoedigende woorden, hulp, ideeën en discussies. Jullie hebben elke werkdag leuker gemaakt. Met name onze wijn avondjes, borrels, congressen, tripjes, klets aanvallen (sorry kamer 212), de prosecco-open-momenten en nog zo veel meer hebben mijn PhD tijd zo bijzonder gemaakt! Jullie zijn ontzettend goede vriendinnen geworden.

Beste **Mark** en **Tineke**, in de afgelopen 5 jaren zijn jullie onderdeel van mijn Groningse familie geworden. In alles wat ik heb gedaan, hebben jullie me ondersteund en dat waardeer ik ontzettend. **Mark**, ik heb zo veel aan jouw hulp en aanmoediging gehad. Jouw vermogen om altijd het grotere plaatje te zien en je oneindige kennis over de wetenschap en het leven in het algemeen hebben me enorm geïnspireerd. Jouw positieve levensinstek, je humor en je passie en drive om altijd te blijven leren zijn een groot voorbeeld voor mij. Ik heb je als een wijze en lieve man leren kennen en je zult altijd in mijn hart blijven.

Roos, in ons denkwijze en aanpak lijken we heel veel op elkaar. Daarom kun je mij ook altijd zo goed begrijpen en mij helpen om weer een stap verder te zetten. Bedankt voor het luisteren en voor het zijn van zo'n een ontzettend goede vriendin. **Lauren**, ook aan jouw steun en gezelligheid heb ik veel gehad! Onze leuke avondjes en borrels met z'n drieën hebben me veel energie gegeven.

Frederik, manchmal fühlt es sich wie gestern an, dass wir zusammen im Sprachkurs saßen und kein Wort Niederländisch verstanden haben. In den letzten acht Jahren haben wir uns Groningen zusammen zu unserem Zuhause gemacht. Wie durch Zufall liefen unsere Wege immer parallel. Danke, dass du immer da warst! Ich hätte dich in der Aula gern neben mir gehabt.

Sassi, obwohl hunderte Kilometer zwischen uns liegen, warst du immer für mich da. Mit niemandem anders kann ich so lachen und genießen wie mit dir. Danke fürs Zuhören, Mut zureden und all die wunderschönen Auszeiten, die wir zusammen hatten.

Mama und Papa, ihr habt mich beschützt vor Kampfameisen, mich unterstützt in Matlab-Krisen und mich immer motiviert meinen eigenen Weg zu gehen. Die Person, die ich heute bin, bin ich durch euch geworden und daher ist euch wahrscheinlich am meisten zu danken, dass dieses Buch zustande gekommen ist. In großen Entscheidungsmomenten habt ihr mein ewiges Hin und Her auf euch genommen und mich auf den richtigen Weg geführt. Aber auch bei jeder Kleinigkeit konnte ich auf euren Rat zählen. 'Zuhause seit immer nur ihr'. Danke für eure grenzenlose Unterstützung.

Marie, meine kleine Schwester, egal ob im Juistweg, Helferwestsingel oder in Lüneburg, du bist immer an meiner Seite, korrigierst meine Texte und hörst dir meine Sorgen an. Auch wenn ich manchmal T-shirts vermisste oder für 'Krauli' zuständig bin, du bist unersetzlich und ein wichtiger Teil von meinem Leben. Zusammen mit **Tim** (auch an dich geht ein dickes Dankeschön) gelingt es dir immer, mich auf andere Gedanken zu bringen und das Leben beim Boccia spielen, Zelten und vielen anderen Dingen zu genießen. Deine zurückgekehrten Deutschkenntnisse geben mir Hoffnung. Ein großes Dankeschön geht auch an euch, **Heike** und **Norbert**. Ihr habt immer großes Interesse an meiner Arbeit gezeigt und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Philipp, ohne dich wäre dieses Buch nicht zustande gekommen. Egal ob beim Figuren gestalten, Strategie besprechen, Aufstehen, oder beim Zwiebeln schneiden – es gab keinen Moment in dem du nicht für mich da warst. Deine Gelassenheit und gute Laune haben mir geholfen jede Stresssituation zu meistern und mich zu entspannen. Du gibst mir das Gefühl alles erreichen zu können. Keiner versteht mich so gut wie du – du bist der 'Brocken in meiner Flut'. Danke für deine bedingungslose Liebe, deine Unterstützung und Geduld.

CURRICULUM VITAE

Laura Golenia was born on July 17th 1989 in Munich, Germany. In 2010, she moved to the Netherlands to study Human Movement Sciences at the University of Groningen. Laura obtained her Bachelor's degree in 2013 and her Master's degree with *cum laude* in 2015. Laura also completed the Bachelor and Master Honours College. During her studies, she was a student teacher in several Bachelor classes, organized multiple activities with the student association, and helped to improve the curriculum of Human Movement Sciences. In 2014, Laura published an experimental study about motor learning in a top 25% journal, setting the stage for a fully-funded MS-PhD trajectory at the University Medical Center Groningen.



Laura's PhD studies focused on motor development and motor control in 5 to 10-year-old typically and atypically developing children. In addition to her research work, Laura gathered educational experience by giving, for example, several lectures in a first-year Bachelor class. During her time as PhD student, Laura stayed at the Infant Action lab of the New York University for four months, where Prof. Dr. Karen Adolph was her advisor. This collaboration resulted in two joint publications. One of these papers won the Graduate School of Medical Sciences 'Top publication Award'. In addition, Laura was awarded with the 'Best Poster Presentation' at the Motor Control 2016 Conference and with the 'PhD Researcher of the Year 2017 Award' of the Department of Human Movement Sciences.

Currently, Laura is looking to continue her career in human movement science.

SCIENTIFIC OUTPUT

Golenia L, Bongers RM, von Hoorn JF, Otten E, Mouton LJ, Schoemaker MM (2018). Variability in coordination patterns in children with developmental coordination disorder (DCD). *Human Movement Science* 60: 202-2013.

Tuitert I, Valk T, Otten B, **Golenia L**, Bongers RM (2018). What to Consider when Choosing a Method to Create the Linear Model for Uncontrolled Manifold Method Analysis. *Motor Control*.

Golenia L, Schoemaker MM, Otten E, Tuitert I, Bongers RM (2018). The development of consistency and flexibility in goal directed reaching during mid-childhood. *Developmental Psychobiology* 00: 1–9.

Golenia L, Schoemaker MM, Otten E, Mouton LJ, Bongers RM (2018). Development of Reaching During Mid-Childhood from a Developmental Systems Perspective. *PLoS ONE* 13 (2): e0193463.

Golenia L, Schoemaker MM, Otten E, Mouton LJ, Bongers RM (2017). What the Dynamic Systems Approach Can Offer for Understanding Development: An Example of Mid-childhood Reaching. *Frontiers in Psychology* 8:1774.

Lee DK, Cole W, **Golenia L**, Adolph KE (2017). The Cost of Simplifying Complex Developmental Phenomena: A New Perspective on Learning to Walk. *Developmental Science*, e12615.

Golenia L, Schoemaker MM, Mouton LJ, Bongers RM (2014). Individual Differences in Learning a Novel Discrete Motor Task. *PLoS ONE* 9(11): e112806.

MANUSCRIPTS IN PROGRESS

Rachwani J, **Golenia L**, Hertzberg-Keller O, Adolph KE. Postural, Visual, and Manual Coordination in the Development of Prehension.

CONFERENCE CONTRIBUTIONS (PRESENTING AUTHOR)

Golenia L, Schoemaker MM, Otten E, van Hoorn JF, Mouton LJ, Bongers RM. Coordination dynamics in children with Developmental Coordination Disorder. Oral presentation at *15th European Workshop on Ecological Psychology 2018, Montauban, France*.

Golenia L, Schoemaker MM, Otten B, Bongers RM. The Influence of Constraints on Reaching Synergies During Mid-Childhood Development. Poster presentation at *Progress in Motor Control 2017, Miami, Florida*.

Golenia L, Schoemaker MM, Mouton LJ, Bongers RM. Exploring task solutions during development. Poster presentation at *Motor Control 2016, Wisla, Poland*.

Golenia L, Schoemaker MM, Mouton LJ, Bongers RM. Exploratory motor behavior during development. Do children between 6 and 10 years-of-age explore task solutions of aiming movements? Oral presentation at *14th European Workshop on Ecological Psychology 2016, Groningen, Netherlands*.

Golenia L, Bongers RM, Mouton LJ, Schoemaker MM. Motor variability in development: Exploring task solutions. Oral presentation at *North American Society for the Psychology of Sport and Physical Activity 2016, Montreal, Canada*.

Lee DK, **Golenia L**, Cole W, Adolph KE. How infants really learn to walk. Poster presentation at *North American Society for the Psychology of Sport and Physical Activity 2016, Montreal, Canada*.

Lee DK, **Golenia L**, Cole W, Adolph KE. Natural infant walking. Poster presentation at *International Conference on Infant Studies 2016, New Orleans, Louisiana*.

Golenia L, Schoemaker MM, Mouton JL, Bongers RM. Individual differences in motor learning. Oral presentation at *4th International Congress on Complex Systems in Sports and Healthy Ageing 2014, Groningen, The Netherlands*.